

# Perbandingan *FTA* dan *Markov Analysis* pada Sistem Hidraulik Pesawat N219 berdasarkan Kegagalan “*Total Loss of Braking Function*”

Yoga Yulasmana

email: yyulasmana@gmail.com

Program Studi Teknik Penerbangan Fakultas Teknik

Universitas Nurtanio Bandung

Jl. Pajajaran no 219 Bandung 40174

## ABSTRAK

Secara umum, tulisan ini berisi tentang penilaian keselamatan yang dilakukan pada sistem hidraulik Pesawat N219 untuk memastikan bahwa sistem tersebut dapat memenuhi persyaratan keselamatan. Selanjutnya, persyaratan keselamatan akan ditetapkan oleh otoritas penerbangan sebagai dasar sertifikasi untuk memenuhi CASR 23 sesuai dengan kategori N219 sebagai pesawat kategori komuter. Untuk melakukan proses penilaian keselamatan pada sistem ini, tulisan ini mengikuti proses yang diuraikan dalam dokumen *SAE ARP4761*. Proses tersebut mencakup *Functional Hazard Assessment (FHA)*, *Preliminary System Safety Assessment (PSSA)*, dan *System Safety Assessment (SSA)*. Kemudian, proses tersebut akan fokus pada analisis kuantitatif untuk proses SSA berdasarkan kegagalan untuk “*total loss of braking function*”. Secara khusus, analisis kuantitatif untuk proses ini akan menggunakan *Fault Tree Analysis (FTA)* dan *Markov Analysis (MA)* untuk membuat evaluasi secara komparatif. Karena Pesawat N219 masih dalam tahap mendapatkan *Type Certificate*, hasil komparatif yang diperoleh dari kedua metode dapat dipertimbangkan dalam pengembangan Pesawat N219 untuk versi militer. Selanjutnya, hasil perbandingan analisis kuantitatif dari tulisan ini diharapkan dapat diterapkan pada kondisi kegagalan lainnya karena modifikasi atau komponen tambahan dari sistem Pesawat N219 yang sudah ada.

## PENDAHULUAN

Sistem hidraulik pesawat terbang harus aman dan dapat diandalkan untuk dapat memenuhi fungsi dalam periode yang relatif lama tanpa risiko adanya kegagalan. Pesawat N219 memiliki spesifikasi umum yang diperuntukan untuk misi multiguna di daerah terpencil dan sangat cocok untuk spesifikasi pesawat militer. Ini menuntut agar Pesawat N219 dapat dioperasikan di lapangan terbang *semi-prepared* yang cocok dengan kondisi di kepulauan Indonesia. Spesifikasi ini tidak dapat dipisahkan dari sistem *braking* dan *steering* yang dihasilkan oleh sistem hidraulik. Hal ini menjadi alasan utama mengapa sistem hidraulik dipilih untuk menjadi perhatian khusus dalam penelitian ini sebagai salah satu sistem yang akan dinilai dari beberapa sistem yang ada di Pesawat N219.

Saat ini, *Fault Tree Analysis (FTA)* banyak digunakan sebagai metode analisis kuantitatif untuk penilaian keselamatan. Dalam penelitian ini juga menerapkan *Markov Analysis (MA)* ke dalam metode analisis penilaian keselamatan bersama dengan FTA sebagai data verifikasi dan data komparatif.

## DASAR TEORI

Berikut ini adalah beberapa literatur yang berkaitan dengan *Fault Tree Analysis (FTA)* dan *Markov Analysis (MA)* sebagai bagian dari metode analisis penilaian keselamatan dalam tulisan ini.

Keadaan kegagalan sistem kontrol penerbangan dimodelkan dan dianalisis masing-masing dengan menggunakan *MA* dan *FTA*, dan hasilnya menunjukkan bahwa metode *MA* memiliki akurasi yang lebih tinggi dari analisis kuantitatif *FTA* secara *sequence-related events*. Metode ini juga mengatasi kekurangan-kekurangan yang terdapat dari analisis statis FTA [1].

Namun, sebagai perbandingan obyektif antara *FTA* dan *MA*, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan yang tentu akan menjadi perhatian dan pertimbangan khusus tentunya [2].

Kelebihan dari *FTA* adalah sistem yang kompleks dapat ditangani dengan mendekomposisi sistem tersebut menjadi bagian yang terpisah (dengan *fault tree* masing-masing), dan model dapat dipahami oleh kalangan non-spesialis. Namun demikian, kelemahan perhitungan *FTA* umumnya ditujukan pada satu *top-event* yang spesifik saja, sehingga untuk model yang lain seperti apakah sistem tersebut aman dan berbahaya, atau seperti model *sequential events* yang mana tidak dapat dimodelkan menggunakan *FTA* biasa, sehingga dapat menyebabkan interaksi antara tiap peristiwa (*event*) tidak dapat dimodelkan.

Di sisi lain, keunggulan *MA* ialah sangat terperinci, deskripsi sistem lengkap dalam satu model dapat ditunjukkan melalui skenario perbaikan yang berbeda dan dapat dimodelkan secara

dependensi urutan. Keuntungan seperti itu tentu harus melalui proses analisis yang cukup rumit, model yang sulit dibangun dan proses verifikasi data untuk non-spesialis membutuhkan model yang sangat luas (jika diukur dalam *number of states*) dan secara umum dalam setiap perubahan sistem, maka model baru harus dibuat.

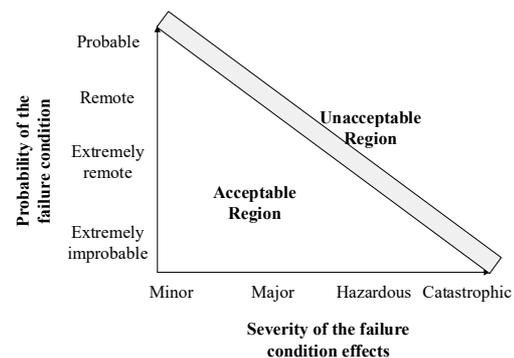
Perbandingan teknik kuantitatif yang berbeda ini menunjukkan bahwa *MA* cukup mencakup sebagian besar aspek untuk evaluasi keselamatan kuantitatif, meskipun *MA* lebih kompleks namun memiliki hasil analisis yang lebih akurat dibandingkan dengan *FTA*. Sejatinnya kedua teknik analisis ini merupakan teknik yang sudah lama terbukti dan teruji selama bertahun-tahun. Kemudian hasil dari dua pendekatan teknik analisis ini juga tergantung pada beberapa kesimpulan yang relatif [3].

Dari tinjauan beberapa literatur tersebut, tulisan ini menarik kesimpulan untuk mempertimbangkan penerapan *MA* menjadi teknik yang dapat melengkapi dan sebagai salah satu metode analisis keselamatan selain *FTA* yang sebagian besar saat ini lebih banyak digunakan dalam metode kuantitatif *System Safety Analysis (SSA)* karena alasan untuk tujuan efisiensi waktu.

### **SAFETY OBJECTIVE**

Saat proses sertifikasi pesawat baru begitu juga dengan beberapa sistem yang disematkan, manufaktur pesawat harus dapat melakukan penilaian

komprehensif terhadap potensi kegagalan dari sistem tersebut. Hubungan logis yang terbalik dan dapat diterima harus ada antara probabilitas rata-rata per jam penerbangan dan tingkat keparahan (*severity*) dari efek kondisi kegagalan yang terjadi[4].



**Gambar 1** *Safety Objective* untuk probabilitas dan tingkat keparahan dari kondisi kegagalan

Dokumen *SAE ARP4761* menjelaskan tentang pedoman dan metode dalam melakukan penilaian keselamatan untuk pesawat udara sipil. Ini terutama terkait dengan pemenuhan persyaratan untuk *CASR 23* pada bagian 1309 [1]. Dokumen ini menyajikan pedoman untuk melakukan penilaian keselamatan yang banyak diterapkan industri penerbangan yang terdiri dari *Functional Hazard Assessment (FHA)*, *Preliminary System Safety Assessment (PSSA)*, dan *System Safety Assessment (SSA)*.

Proses penilaian keselamatan tersebut meliputi persyaratan dan verifikasi data yang mendukung kegiatan pengembangan pesawat. Proses ini menyediakan metodologi untuk mengevaluasi fungsi-fungsi pesawat terbang dan desain fungsi sistem untuk

menentukan bahwa bahaya-bahaya yang dapat terjadi telah ditangani dengan benar.

## **METODE ANALISIS KESELAMATAN**

*FTA* adalah analisis kegagalan deduktif yang berfokus pada satu peristiwa tertentu yang tidak diinginkan (*undesired event*) dan memberikan metode untuk menentukan penyebab peristiwa tersebut, *FTA* adalah prosedur evaluasi sistem "*top-down*" dimana model kualitatif untuk kejadian yang tidak diinginkan tersebut dibentuk dan kemudian dievaluasi. Perhitungan *fault tree* didasarkan pada model aljabar Boolean, teori probabilitas, dan teori reliabilitas [5].

*MA* adalah metode untuk menghitung probabilitas sistem yang memiliki variasi kondisi (*state*) sebagai fungsi dari waktu. *MA* dapat digunakan untuk memodelkan operasional, atau kegagalan, dari desain sistem yang kompleks, dapat memberikan model matematika yang sangat terperinci tentang kondisi kegagalan sistem, transisi keadaan, dan pengaturan fungsi waktu. Proses *MA* mengevaluasi probabilitas dari suatu kondisi yang diketahui ke kondisi logis berikutnya hingga sistem tersebut mencapai kondisi akhir.

## **PROSES PENILAIAN KESELAMATAN**

Kerusakan atau kehilangan fungsi dari sistem hidraulik pada Pesawat N219 dapat berkontribusi pada kondisi kegagalan yang akan berdampak pada pesawat dan

penumpangannya, baik langsung dan konsekuensial. Situasi ini dapat mempengaruhi keselamatan untuk keberlanjutan operasi penerbangan serta pendaratan. Oleh karena itu diperlukan penilaian dari fungsi sistem untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan kondisi kegagalan yang terjadi.

### **a. N219 Aircraft level**

Pada tahap ini pembahasan difokuskan pada identifikasi fungsi pesawat "*to control aircraft on the ground*" karena fungsi tersebut dihasilkan oleh sistem *braking* dan *steering*.

### **b. N219 System level**

Persyaratan keselamatan untuk fungsi dari sistem ditentukan dengan mengidentifikasi dan mengklasifikasikan kondisi kegagalan fungsional terkait. Pembahasan ini ditekankan pada identifikasi fungsi yang berhubungan langsung dengan sistem *braking*.

Selanjutnya, sistem *Failure Hazard Analysis (FHA)* akan didasarkan pada analisis dari kondisi kegagalan fungsinya, dengan mempertimbangkan mode kegagalan tunggal dan ganda di kondisi normal dan terdegradasi.

Dalam hal ini, kegagalan "*Total loss of braking function*" merupakan kondisi kegagalan kritis karena memiliki nilai *Safety Objective "Hazardous"*, seperti yang disarankan pada AC 23.1309 paragraf 16 (b) tentang Penilaian Keselamatan.

**Tabel 1** Fungsi Sistem

System	No	Function
Braking System	1.	To brake the aircraft
	2	To brake the aircraft during parking

**Tabel 2** FHA untuk “Brake control system”

System: Brake Control System				Function: To brake the aircraft		
No.	Failure Condition	Flight Phase	Detection	Effect of Failure	Safety Objective	Remarks
1.	Total loss of braking function	Reject Take-off (RTO), Landing.	Crew sense	Aircraft cannot be stopped within prescribed runway length (Depend on runway length condition). Serious injury to the occupant.	Hazardous/ $\leq 1.0 \times E-07$	Crew action: Use reverse thrust. (Propeller thrust) or Parking brake

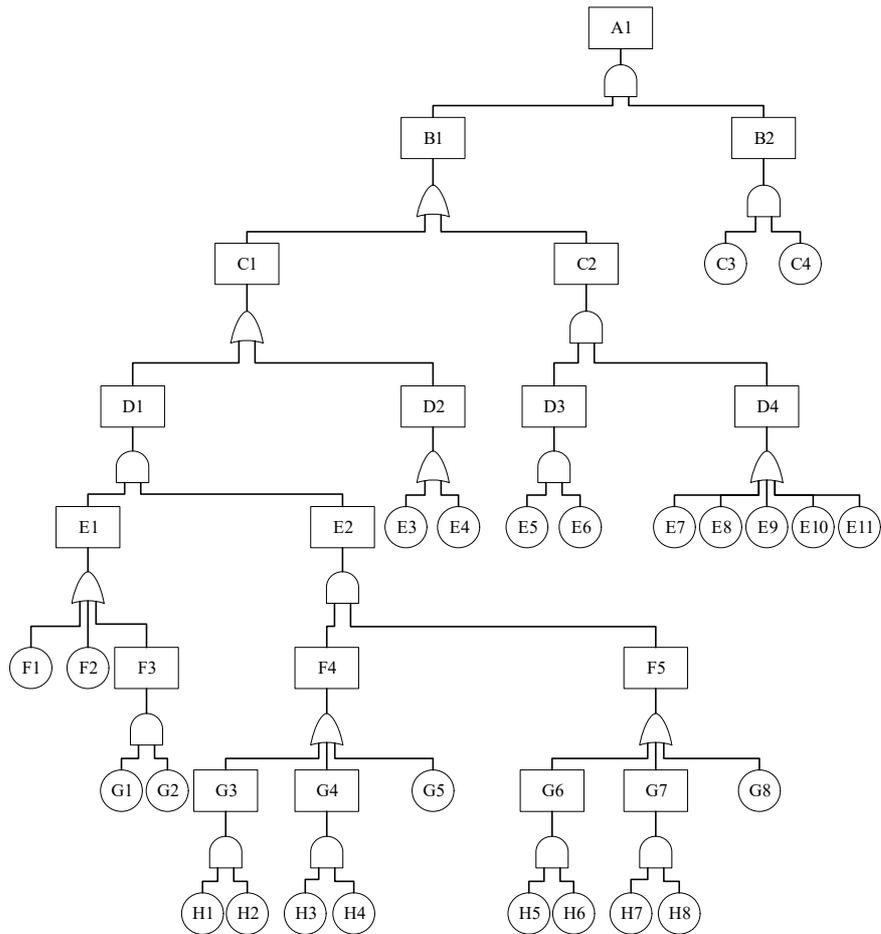
c. Probabilitas Kegagalan *Basic Event*

*Basic event* mewakili probabilitas kegagalan suatu peralatan atau komponen dalam sistem. Probabilitas kegagalan ini merupakan fungsi *failure rate* ( $\lambda$ ) dan *exposure time* untuk peristiwa yang dimodelkan tersebut. Total *exposure time* untuk sistem hidraulik,

kontrol *braking* dan *steering* pada Pesawat N219 adalah 0,14 jam. Nilai ini

d. *Fault Tree Analysis*

Setelah mendefinisikan desain sistem dan operasi yang diperoleh dari data desain (gambar, skema, prosedur, diagram, dll.) Dengan mendefinisikan masalah secara deskriptif dan menetapkan *undesired event* secara tepat untuk kebutuhan analisis melalui klasifikasi kondisi kegagalan *Catastrophic* atau *Hazardous* (kondisi kegagalan kritis) yang akan menjadi *top event* dalam *fault tree*.



**Gambar 2** *Fault tree* untuk kondisi kegagalan "Total loss of braking function"

**Tabel 3** Event untuk kondisi kegagalan "Total loss of braking function"

Event	Failure Condition	Event	Failure Condition
A1	Total loss of braking function	E5	Hydraulic accumulator 1 leakage
B1	Total loss of primary braking function	E6	Hydraulic accumulator 2 leakage
B2	Total loss of reverse thrust on both engines	E7	Hydraulic reservoir leakage
C1	Total loss of braking mechanical parts	E8	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure
C2	Total loss of hydraulic power generation	E9	Motor driven hydraulic pump improper output
C3	LH engine fails to reverse thrust	E10	Pressure relief valve stuck closed
C4	RH engine fails to reverse thrust	E11	Non-return valve stuck closed
D1	Total loss of main and secondary braking mechanicals	F1	Parking brake input lever jammed
D2	Both main landing gear break assemblies broken	F2	Brake emergency or parking valve stuck closed
D3	Total loss of secondary hydraulic power	F3	Both brake shuttle valves on inlet line of brake assy stuck closed
D4	Loss of main hydraulic power	F4	Loss of braking control on copilot side
E1	Loss of parking emergency brake control	F5	Loss of braking control on pilot side
E2	Total loss of main braking control	G1	Brake shuttle valve on LH inlet line of brake assy stuck closed
E3	LH main landing gear break assemblies broken	G2	Brake shuttle valve on RH inlet line of brake assy stuck closed
E4	RH main landing gear break assemblies broken		

Event	Failure Condition
G3	Both brake pedals on copilot side jammed
G4	Both brake metering valves on copilot side stuck closed
G5	Brake shuttle valve on copilot side stuck closed
G6	Both brake pedals on pilot side jammed
G7	Both brake metering valves on pilot side stuck closed
G8	Brake shuttle valve on pilot side stuck closed

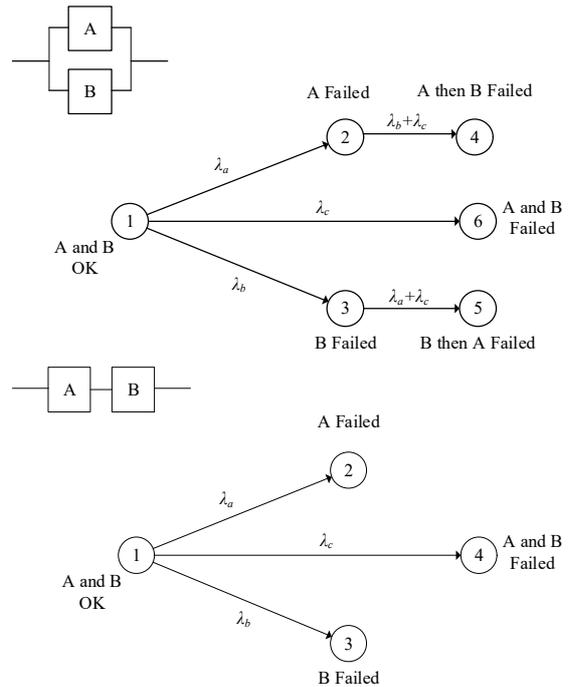
Event	Failure Condition
H1	LH copilot brake pedal jammed
H2	RH copilot brake pedal jammed
H3	LH copilot brake metering valve stuck closed
H4	RH copilot brake metering valve stuck closed
H5	LH pilot brake pedal jammed
H6	RH pilot brake pedal jammed
H7	LH pilot brake metering valve stuck closed
H8	RH pilot brake metering valve stuck closed

**Tabel 4** Probabilitas kegagalan “Top Event” untuk FTA

Top Event	Failure Condition	Minimal Cut Set
A1	Total loss of braking function	$[F1 + F2 + [G1 \cdot G2]] \cdot [[H1 \cdot H2] + [H3 \cdot H4] + G5] \cdot [[H5 \cdot H6] + [H7 \cdot H8] + G8] + [E3 + E4] + [E5 \cdot E6] \cdot [E7 + E8 + E9 + E10 + E11] \cdot [C3 \cdot C4]$

**e. Markov Analysis**

Proses MA sepenuhnya ditandai oleh matriks probabilitas transisinya, yang dikembangkan dari diagram transisi. Peristiwa yang terjadi melibatkan kegagalan komponen. Probabilitas transisi antar keadaan (*states*) merupakan fungsi dari tingkat kegagalan dari berbagai komponen sistem. Dengan menggunakan sistem persamaan diferensial orde pertama probabilitas digambarkan berada di suatu keadaan yang memiliki probabilitas transisi dari dan ke masing-masing keadaan yang lain.



**Gambar 3** Diagram Markov untuk sistem dua komponen, paralel dan series

Sebagai contoh Model MA dengan dua komponen kegagalan sistem didefinisikan sebagai kegagalan komponen A dan B. Dengan asumsi *failure rate* untuk komponen A dan B masing-masing adalah  $\lambda_a$  dan  $\lambda_b$ , untuk kedua komponen yang gagal adalah  $\lambda_c$ . Analisis keselamatan untuk tulisan ini juga akan melibatkan sistem untuk lebih dari dua komponen sistem dan seterusnya tergantung pada pertimbangan kondisi kegagalan yang akan diamati.

Untuk sistem dua komponen-paralel Markov ekuivalen dengan dua komponen dengan logika gerbang AND pada FTA, sedangkan series ekuivalen dengan OR pada FTA, dan begitu seterusnya sesuai dengan banyaknya komponen yang akan dihitung.

Dua Komponen-Series:

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} (1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t})$$

$$P_3(t) = \frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} (1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t})$$

$$P_4(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} (1 - e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t})$$

Dua Komponen-Paralel:

$$P_1(t) = -\frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} \left( \frac{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)}{\lambda_c} \right) e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_2(t) = e^{-(\lambda_b + \lambda_c)t} + -\frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} \left( \frac{(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)}{\lambda_c} \right) e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_3(t) = e^{-(\lambda_a + \lambda_c)t} + -\frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} \left( \frac{(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)}{\lambda_c} \right) e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_4(t) = \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} e^{0t} - e^{-(\lambda_b + \lambda_c)t} - \frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} \left( \frac{-(\lambda_b + \lambda_c)}{\lambda_c} \right) e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_5(t) = \frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} e^{0t} - e^{-(\lambda_a + \lambda_c)t} - \frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} \left( \frac{-(\lambda_a + \lambda_c)}{\lambda_c} \right) e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

$$P_6(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} e^{0t} - \frac{\lambda_c}{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c} e^{-(\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c)t}$$

Dapat dilihat bahwa perhitungan dengan menggunakan MA menghasilkan solusi penyelesaian yang cukup rumit khususnya untuk skenario paralel, semakin banyak komponen yang dilibatkan semakin rumit solusi yang didapat, namun MA memiliki keunggulan dibanding FTA dari hasil perhitungan sesuai dengan pembahasan sebelumnya.

**HASIL**

**Tabel 5** Perbandingan Probabilitas FTA dan MA terhadap kegagalan “Total loss of braking function”

t (hours)	Probability FTA	Probability MA
1	8.2766E-19	8.2764E-19
10	8.2766E-18	8.2764E-18
100	8.2766E-17	8.2764E-17
1000	8.2766E-16	8.2764E-16
10000	8.2766E-15	8.2761E-15
100000	8.2766E-14	8.2730E-14
1000000	8.2766E-13	8.2419E-13

Terdapat perbedaan yang tidak signifikan antara FTA dan MA namun hasil perhitungan MA dapat memberikan skenario kegagalan dengan urutan (*sequenced related event*) yang lebih detail dibandingkan dengan FTA, dimulai dari *basic event* menuju ke *middle event* hingga *top event* yang masing-masing dari event tersebut memiliki nilai probabilitas kegagalan yang bisa saja dipertimbangkan sesuai dengan kebutuhan, berikut salah satu contoh hasil perhitungan *middle event* secara series menggunakan 3 komponen, yang

didapat dari kegagalan event F4 atau F5 untuk "Loss of braking control on (co) pilot side".

**Tabel 6** Hasil perhitungan untuk event F4 atau F5

$P_i(t)$	Failure Condition	Probability
$P_2(t)$	Both brake pedals on copilot side jammed	6.7081E-14
$P_3(t)$	Both brake metering valves on copilot side stuck closed	6.3171E-11
$P_4(t)$	Brake shuttle valve on copilot side stuck closed	1.4000E-06
$P_5(t)$	All components fail simultaneously	5.9326E-30
$P_6(t)$	Both brake pedals on copilot side jammed and both brake metering valves on copilot side stuck closed simultaneously	4.2376E-24
$P_7(t)$	Both brake pedals on copilot side jammed and brake shuttle valve on copilot side stuck closed fail simultaneously	9.3913E-20
$P_8(t)$	Both brake metering valves on copilot side stuck closed and brake shuttle valve on copilot side stuck closed simultaneously	8.8440E-17

Contoh hasil perhitungan middle event lain secara paralel menggunakan 2 komponen, yang didapat dari kegagalan event D1 untuk "Total loss of main and secondary braking mechanicals"

**Tabel 7** Hasil perhitungan untuk event D1

$P_i(t)$	Failure Condition	Probability
$P_2(t)$	Loss of parking emergency brake control	9.2607E-06
$P_3(t)$	Total loss of main braking control	1.9602E-12
$P_4(t)$	Loss of parking emergency brake control followed by total loss of main braking control	6.6683E-17
$P_5(t)$	Total loss of main braking control followed by loss of parking emergency brake control	6.4338E-17
$P_6(t)$	Both functions fail simultaneously	1.8153E-17

Contoh basic event D4 untuk "Loss of main hydraulic power".

**Tabel 8** Hasil perhitungan untuk event D4

$P_i(t)$	Failure Condition	Probability
$P_2(t)$	Hydraulic reservoir leakage	4.7179E-07
$P_3(t)$	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure	8.7171E-06
$P_4(t)$	Motor driven hydraulic pump improper output	1.3889E-05
$P_5(t)$	Pressure relief valve stuck closed	1.2881E-07
$P_6(t)$	Non-return valve stuck closed	7.2799E-07
$P_7(t)$	Hydraulic reservoir leakage and bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure simultaneously	4.1127E-12
$P_8(t)$	Hydraulic reservoir leakage and motor driven hydraulic pump improper output simultaneously	6.5529E-12
$P_9(t)$	Hydraulic reservoir leakage and pressure	6.0774E-14

$P_i(t)$	Failure Condition	Probability
	relief valve stuck closed simultaneously	
$P_{10}(t)$	Hydraulic reservoir leakage and non-return valve stuck closed simultaneously	3.4347E-13
$P_{11}(t)$	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure and motor driven hydraulic pump improper output simultaneously	1.2107E-10
$P_{12}(t)$	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure and pressure relief valve stuck closed simultaneously	1.1229E-12
$P_{13}(t)$	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure and non-return valve stuck closed simultaneously	6.3460E-12
$P_{14}(t)$	Motor driven hydraulic pump improper output and pressure relief valve stuck closed simultaneously	1.7891E-12
$P_{15}(t)$	Motor driven hydraulic pump improper output and non-return valve stuck closed simultaneously	1.0111E-11
$P_{16}(t)$	Motor driven hydraulic pump improper output and non-return valve stuck closed simultaneously	9.3775E-14
....	....	....
$P_{32}(t)$	Bootstrap reservoir fails to maintain hydraulic pressure, motor	1.1354E-23

$P_i(t)$	Failure Condition	Probability
	driven hydraulic pump improper output, pressure relief valve stuck closed, and non-return valve stuck closed occur simultaneously	

Hasil probabilitas yang didapat dari Tabel 8 menunjukkan hasil nilai dari setiap *event* sesuai dengan urutan skenario kegagalan, jumlah skenario dari probabilitas kegagalan 5 komponen secara series menghasilkan 32 skenario probabilitas kegagalan, tabel diatas membatasi hingga 16 probabilitas dari total 32 probabilitas kegagalan mengingat kebutuhan ruang menulis dari tulisan ini.

**KESIMPULAN**

Hasil perbandingan yang diperoleh dari metode FTA dan MA menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan. Perbedaan perbandingan hasil hanya ditemukan dalam fungsi waktu yang lebih tinggi dalam sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa MA dapat digunakan sebagai metode validasi untuk FTA juga, dan sebaliknya. Upaya ini adalah untuk melakukan evaluasi komprehensif untuk memverifikasi keamanan keseluruhan sistem dan untuk mencakup semua pertimbangan keselamatan khusus.

Sebagai hasil perhitungan MA, MA memiliki solvabilitas yang lebih tinggi daripada FTA, dimana MA memiliki keunggulan solusi untuk skenario kondisi kegagalan dalam akurasi urutan yang dapat

diperoleh dari setiap perhitungan peristiwa. MA dapat menangani skema ini untuk komponen atau peristiwa yang didesain baik secara seri atau paralel secara detail dan menghasilkan nilai probabilitas untuk sistem yang gagal secara berurutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Federal Aviation Administration (2011): System Safety Analysis and Assessment for Part 23 Airplanes, ACE-100, Small Airplane Directorate.
- [2] Jianzhong, Y. and Julian, Z. (2011): Application Research of Markov in Flight Control System Safety Analysis, *Procedia Engineering* 17 (2011) 515 – 520.
- [3] Rouvroye, J.L. (2001): Enhanced Markov Analysis as A Method to Assess Safety in the Process Industry, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- [4] Andrews, J.D. and Ericson, C.A. (2000): Fault Tree and Markov Analysis Applied to Various Design Complexities, 18th International System Safety Conference September 11-16 2000, Fort Worth Texas, Radisson Plaza.
- [5] Kritzinger, D. (2016): Aircraft System Safety: Assessments for Initial Airworthiness Certification, Elsevier Ltd, UK.
- [6] Society of Automotive Engineers Inc. (1996): SAE ARP4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, Warrendale, PA, SAE International.
- [7] Society of Automotive Engineers Inc. (1996): SAE ARP4754 Certification Considerations for Highly-integrated or Complex Aircraft Systems, Warrendale, PA, SAE International.
- [8] Republic of Indonesia, Ministry of Transportation (2014): Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes, Amendment 2, Indonesia.